E/CONF.39/A/214
30 Oct.1962
ORIGINAL : ESPAÑOL

CONFERENCIA DE LAS NACIONES UNIDAS
SOBRE LA APLICACION DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGIA
EN BENEFICIO DE LAS REGIONES MENOS DESARROLLADAS

Punto del programa : A. 3

Chile

METODOS HIDROLOGICOS UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO HIDROELECTRICO DE CHILE

Por Eduardo BASSO S.,
Ingeniero Civil,
Jefe Subrogante de la División de Hidrología
de la Empresa Nacional de Electricidad, S. A.,
Chile

Las monografías presentadas en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Aplicación de la Ciencia y la Tecnología en Beneficio de las Regiones Menos Desarrolladas constituyen documentos de trabajo de dicha Conferencia. Se publican tal como han sido presentadas por los colaboradores y los puntos de vista expresados en ellas corresponden a los colaboradores. (Veanse notas al dorso.)

NOTAS

1. Las monografías seleccionadas para las Sesiones Generales serán distribuidas en la Conferencia en los siguientes idiomas oficiales de las Naciones Unidas: español, francés, inglés y ruso.

2. Las monografías seleccionadas para las Sesiones Especiales serán distribuidas en la Conferencia únicamente en uno de los idiomas oficiales antes indicados.

3. Los resúmenes de las monografías presentadas por los colaboradores serán distribuidos en la Conferencia en los siguientes idiomas oficiales de las Naciones Unidas: español, francés, inglés y ruso.

4. No se procederá a la distribución general de las monografías y resúmenes con antelación a la Conferencia. Unicamente serán publicadas en cantidades limitadas con antelación a la Conferencia para uso exclusivo de las delegaciones de los gobiernos participantes y de otros participantes autorizados. La publicación con posterioridad a la Conferencia y la distribución general de las actas y debates de la Conferencia seguirán las prácticas de las Naciones Unidas establecidds por ia Junta de Publicaciones de las Naciones Unidas.

METODOS HIDROLOGICOS UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO HIDROELECTRICO DE CHILE

por Eduardo Basso S.

Ingeniero Civil, Jefe Subrogante de la División de Hidrología de la Empresa Nacional de Electricidad, S. A., Chile

1.- Generalidades

Para el diseño de las centrales hidroeléctricas que constituyen el núcleo de la labor que el Gobierno de Chile ha encomendado a la Empresa Nacional de Electricidad, S.A., (ENDESA), es indispensable contar con la adecuada información hidrológica. La política normal en países en desarrollo tiende hacia un descuido en la recopilación de la información básica, aparentemente improductiva en sus comienzos.

A pesar de que en el momento de creación de ENDESA existía un servicio hidrológico relativamente aceptable, el criterio de los fundadores de esta Empresa fué visionario ya que se dió una extraordinaria importancia a la investigación de los recursos hidráulicos, la que sin lugar a dudas ha dado los frutos que de ella se esperaba.

El crecimiento de la Empreza hizo ver que la necesidad de la Hidrología no disminuía con la terminación de las primeras obras. Al revez, la operación eficiente de las centrales requirió mayor información, y la interconexión de las plantas obligó a una mejor predicción de los caudales de escurrimiento.

2.- Organización del Servicio Hidrológico de ENDESA

La hidrología de ENDESA ha sido encomendada a la División Hidrología, cuya ubicación dentro de la Empresa se indica esquemáticamente en la Fig. I.

Internamente la División consta de dos Sub-divisiones: Hidrometría y Estudios Hidrológicos, las que contaban con el siguiente personal, al 1° de Julio de 1962:

	Jefatura	Sub-División Est. Hidrológicos	Sub-División Hidrometría
Ingenieros	1	7	-
Técnicos	-	11	19
Personal Administrativo	2	-	2
Personal Auxiliar Permanente	-	-	5
Obreros (*)	-	-	50
Total	3	18	76

(*) Término medio para el primer semestre de 1962.

La Sub-División Hidrometría está encargada fundamentalmente de:

a) Construir las instalaciones para medidas meteorológicas e hidrométricas.

b) Hacer las observaciones, ya sea directamente o por medio de observadores dependientes de ellos.

c) Mantener las instalaciones hidrométricas y meteorológicas en buen estado de funcionamiento.

d) Hacer las computaciones preliminares de las observaciones.

A la Sub-División Estudios Hidrológicos se le ha encomendado:

a) Elaborar los datos obtenidos en terreno.

b) Proyectar las instalaciones hidrométricas y meteorológicas y supervigilar su construcción.

c) Efectuar los estudios especiales que le sean solicitados, y

d) Planificar los trabajos de Hidrología.

En la Fig. II se ha representado esquemáticamente la organización de la División Hidrología.

Desde un punto de vista geográfico la oficina central se encuentra ubicada en Santiago. Se están organizando tres centros regionales, en Santiago, Chillán y Osorno, cada uno de los cuales atendería a las oficinas de los hidromensores. Los territorios asignados a cada uno de ellos, se han dibujado en la Fig. III junto con las estaciones hidrométricas existentes y en proyecto.

En el futuro se proyecta dar más importancia a estos centros regionales junto con aumentar el personal destinado a mediciones, lo que se espera conseguir liberando a la Sub-División Estudios Hidrológicos de los cálculos rutinarios mediante el empleo de computadores electrónicos.

3.- Métodos utilizados en el período inicial

En el período inicial se contaba unicamente con escasos datos hidrológicos generalmente en zona de escaso interés hidroeléctrico, ya que la mayor parte de estos registros provenían de la Dirección de Riego del Ministerio de Obras Públicas. Esto obligó a utilizar una serie de métodos, parte de los cuales son originales que permiten suplir las deficiencias de los datos directos. Como este problema se presentará sin lugar a dudas en numerosos países que en estos momentos están en condiciones de iniciar su desarrollo hidroeléctrico, parece interesante dar a conocer dentro de las limitaciones al presente trabajo las ideas generales en que estos sistemas se basaron.

El primer problema radica en el control de los datos recopilados en el pasado y de los cuales no se conoce su precisión. Esto evidentemente se aplica no solo a los datos hidrométricos sino también a los datos meteorológicos.

Para precisar las ideas nos permitiremos explicar el sistema empleado para determinar una estadística de caudales. En primer lugar debe contarse con una estadística de niveles los que pueden ser productos de observaciones directas en un limnímetro o registro de un limnígrafo. Paralelamente debe hacerse medidas del caudal por algunos de los métodos usuales.

En Chile practicamente solo se han empleado los aforos como molinete a los que recientemente se ha agregado el uso de aforos químicos. Con estos datos es posible dibujar una curva de descarga la que permitirá la traducción de los niveles en caudales. De ahí en adelante el trabajo es puramente estadístico. Normalmente las medidas de niveles son confiables y la única precaución de importancia que debió tomarse al revisar las estadísticas antiguas fué la de comprobar la invariabilidad de la cota del limnímetro.

Una de las fuentes más importantes de errores radica en la defectuosa ejecución de los aforos. Sin embargo, es practicamente imposible corregir esta deficiencia y por lo tanto será necesario aceptarlos previo recálculo de acuerdo a una norma uniforme. Las fallas más importantes radican sin embargo en la determinación de la curva de descarga ya que esta curva cambia con los embanques y socavaciones que con mucha frecuencia ocurre en las frecuencias de control. Esto ha hecho que normalmente una sección de control cuente con numerosas curvas de descarga las que generalmente solo cumplen la condición de ajustar bien a los aforos considerados en el cálculo. Sin embargo, el empleo de ciertas premisas elementales permite convertir esta familia de curvas desordenadas en un conjunto armónico.

Las consideraciones que se han tomado en cuenta para el trazado de las curvas de descarga:

a) Todas las curvas deben tener la misma forma.

b) Para gastos muy grandes los efectos de socavación y embanque son despreciables y por lo tanto las curvas deben ser tanjente en su parte superior.

c) El caudal resultante de los cómputos hechos con estas curvas debe ser consecuente con los factores metecrológicos de la hoya.

Para esto último debe procederse por tanteo: se calcula en primer lugar la estadística con una curva y luego se compara los volúmenes de escurrimiento resultantes con una precipitación característica de la hoya. Esta comparación se hace utilizando el sistema de curvas másicas (suma de volúmenes - suma de precipitaciones). Si la estimación fué correcta los puntos se alinearán en una recta (Fig. IV) sino será necesario tantear con otras curvas de descarga hasta que esto se logre.

En la Fig. V se indica la forma en que se han representado esta familia de curvas de descarga.

La determinación de la precipitación característica representa en sí misma un problema de alguna complejidad, el cual no se tratará en este trabajo. Basta decir que para ello también se aborda aplicando el sistema de las curvas másicas, esta vez entre las sumas de las precipitaciones de dos estaciones de medida.

Una vez encontrada una estadística base aceptable es necesario determinar la estadística en el punto donde se ubique la bocatoma de la central hidroeléctrica. La omisión de controles en ese punto no puede aceptarse, pero en ciertos casos, razones de urgencia obligan a iniciar el diseño cuando solo se cuenta con pocos años de estadística. En este caso será necesario extender la estadística corta con el auxilio de la estadística base, corregida de acuerdo con el método ya expuesto.

El método a seguir sería esquematicamente el siguiente:

a) Corregir la estadística corta en la misma forma ya explicada.

b) Hacer correlaciones, mes a mes, entre los gastos de la sección por extender (Q)

y los gastos de la base (Qb). Se obtienen así curvas del tipo

$$Q = f\ (Qb)$$

En general se prefieren las rectas de ecuación

$$Q = A\ Qb + B \quad \ldots\ (1)$$ como se indica en la Fig. VI.

c) Los coeficientes A de la ecuación (1) deben tener una variación gradual. Si eso no ocurre se corrigen los coeficientes mediante el uso del gráfico representado en la Fig. VII.

d) Los datos resultantes deben dar puntos alineados en la representación másica como se ha explicado anteriormente. Si no, deben revisarse las ecuaciones (1).

e) Lo anterior garantiza la precisión del gasto medio anual. Para asegurar que los gastos medios mensuales dan valores satisfactorios, se dibujan curvas de variación estacional del gasto, las que deben tener variaciones lógicas. Una curva de este tipo se dibuja en la Fig. VII.

En algunos casos, ni siquiera se cuenta con estadísticas base. Para estos casos se han desarrollado métodos que pueden dar datos aceptables para datos de ante-proyecto, pero en ningún caso se pueden utilizar en diseños definitivos.

Dos métodos se han empleado de preferencia:

a) Relación de superficies. Si se conoce el caudal (Qb) de una hoya de características similares a la en estudio, su caudal quedaría dado por:

$$Q = \frac{A}{Ab}\ Qb \quad \ldots\ (2)$$

siendo A el área de la hoya en estudio y Ab el área de la hoya base.

b) Rendimiento equivalente. Si además se conocen las precipitaciones P y Pb de ambas hoyas puede mejorarse el cálculo, utilizando

$$Q = \frac{A}{Ab}\ \frac{P}{Pb}\ Qb \quad \ldots\ (3)$$

Debe insistirse nuevamente en el carácter muy aproximado de estos métodos.

4.- Planeamiento de la red futura (2)

La red fluviométrica chilena contaba con 349 estaciones al 30 de Julio de 1961, esto corresponde a 0,50 estaciones por 1.000 km2, esta densidad se indica en la Fig. VIII. Puede notarse que la densidad de estaciones en Chile corresponde a un standard aceptable. Debido a la gran diversidad geográfica del país a pesar de que algunas zonas estan controladas adecuadamente en otras hay una carencia casi absoluta de estaciones. Esto es el caso de las dos provincias australes que son justamente las que contienen el mayor potencial hidroeléctrico.

(2) Stream Gauging Network in the United States
Discussion by Eduardo Basso, Journal of Hydraulics
Division A. S. C. E., November 1961.

En vista de esta deficiencia, el Gobierno de Chile ha obtenido asistencia técnica y económica del Fondo Especial de las Naciones Unidas para y proyecto de expansión de la red de estaciones hidrométricas y meteorológicas.

Con esta expansión la red fluviométrica tendrá un minimun de 484 estaciones

(0.65 estaciones por 1.000 km2) al cabo de 4½ años. El Gobierno contribuirá con US$ 1.220.000 al proyecto y el Fondo Especial con US$ 612.500 en su mayor parte en equipos de importación.

El trabajo será ejecutado por tres oficinas: Dirección de Riego del Ministerio de Obras Públicas, Empresa Nacional de Electricidad S.A. ENDESA y Oficina Meteorológica de Chile.

En la Fig. III se indica la ubicación de las estaciones existentes y de las probables a instalar. Las áreas de concentración de estaciones corresponden a la zona de gran utilización de energía hidroeléctrica o las zonas en que existe un regadío intensivo.

El criterio principal utilizado para ubicar las nuevas estaciones ha considerado en especial el control de los principales ríos aguas arriba de las bocatomas de los canales de regadío y aguas abajo de las uniones de los mayores afluentes. Además algunas estaciones se ubicarán en las partes bajas de los ríos con el objeto de medir las aguas que pasan al mar. La densidad variable de la red propuesta corresponde aproximadamente a la densidad de la población. La completa ausencia de precipitación y escurrimiento en el desierto del norte hacen necesarios los controles en aquellos cursos que contienen agua en forma permanente u ocasional.

5.- Método para la estimación de crecidas

En el diseño de las obras de evacuación, bocatomas, embalses, etc. es necesario contar con la mejor estimación de la crecida que sea posible. A este respecto ENDESA ha estudiado la aplicación de varios métodos, de lo que se dá cuenta esquemáticamente a continuación:

a) Métodos probabilísticos. Los caudales peak de cada año se llevan a un gráfico en función de la probabilidad. A estos valores se ajusta una función de tipo probabilístico. La más utilizada en Chile es la distribución normal - logarítmica. A fin de facilitar los cálculos se utiliza un rayado especial que permite ajustar una recta, como se indica en la Fig. IX Luego se lee el caudal correspondiente a la probabilidad de la crecida extrapolando este ajuste. Este método da resultados satisfactorios cuando las estadísticas son largas y confiables, pero conduce a resultados erróneos en caso contrario.

b) Hidrograma unitario. Este método es usual y se trata en la literatura hidrológica, y por lo tanto no se analizará en este trabajo. Requiere una inscripción continua del gasto, y por lo menos un pluviógrafo, condiciones que en muchos casos no se cumplen. Si estos datos no están disponibles se puede utilizar el hidrograma unitario sintético. En este método el hidrograma unitario (curva caudal - tiempo, para una precipitación unitaria) es función de las características de la hoya y de dos constantes que se determinan para la zona en estudios. Estos coeficientes se han determinado para la zona central de Chile (3).

(3) Aplicación del Método de H. U. sintético a la zona central de Chile. Informe N° 23, División Hidrología, ENDESA.

c) Predicción del rendimiento de una hoya. Si H es la precipitación caída sobre una zona de superficie A, el volúmen caído es:

$$V = H A \quad \ldots (4)$$

de esto escurrirá un N%; o sea:

$$Ve = N\ H\ A$$

Si se acepta una forma de distribución N = f (t), el gasto máximo será:

$$Q = N\ H\ A\ f(t) \quad \ldots (5)$$

siendo t el tiempo transcurrido entre la iniciación de la lluvia y la producción del canal peak.

El valor y la forma de la función f (t) deben determinarse experimentalmente. Para ello se está realizando una experiencia en terreno de la hoya afluente al lago Lliu-Lliu, en las cercanías de Santiago. En la actualidad se utilizan los datos dados por la experiencia extranjera.

d) Envolvente de crecidas. Con este método se llevan en un gráfico los gastos peak unitarios en función de la superficie de la hoya, y se dibuja una envolvente por los gastos mayores. En Chile se han encontrado dos envolventes:

(i) Crecidas de lluvia

(ii) Crecidas de deshielo

En la Fig. X se presenta como ejemplo la envolvente de crecidas de lluvia.

El criterio preferido para la determinación de crecidas de diseño ha sido utilizar el máximo de métodos disponibles y decidir a la vista de todos ellos.

6.- Previsión de los caudales.

Ha sido necesario abordar dos tipos de previsiones de caudales:

a) Previsiones de escurrimiento a largo plazo.

b) Previsiones de crecidas.

a) Previsiones de escurrimiento a largo plazo. En este caso es posible predecir los volúmenes de deshielo en función de los contenidos de agua en la nieve de las montañas de la cordillera de Los Andes. El método de muestreo de nieve es el usual en Estados Unidos y expuestos en numerosos textos.

Las correlaciones nivo-fluviales son bastantes buenas como puede verse en la Fig. XI, permitiendo deducir el volúmen total del deshielo entre Octubre y Abril. El caudal peak (Noviembre o Diciembre) se determina con una correlación análoga. Los gastos de recesión se determinan en función de este caudal peak y los gastos anteriores al deshielo se calculan de modo que se complete un volúmen total predecido.
Se llega así a errores variables según la zona del país, cuyo promedio es del orden del 5% para la predicción del volúmen y del gasto peak y de un 10% a 15% para la predicción de los gastos de los demás meses.

b) Previsiones de crecidas. Este problema es de especial interés en la construcción de obras en la temporada lluviosa y en la operación de embalses. El método empleado es el "flood ruting", con transmisión automática de los datos de niveles y precipitaciones con equipos radiotransmisores. La primera de las instalaciones de este tipo está funcionando para ser

utilizada en la predicción de las crecidas en la Central Rapel, bajo construcción. En esta central el río se desvía por un túnel que periodicamente no tendrá capacidad suficiente, inundando las obras, las que deberán ser evacuadas oportunamente para evitar daños y desgracias.

7.- Otras mediciones y estudios

La naturaleza de este artículo impide explayarse con más detalle en relación a numerosas otras actividades del organismo en estudio. De estas se hará solo una somera reseña.

a) Meteorología. Se controlan estaciones meteorológicas con el siguiente detalle:

Estaciones climatológicas	23
Pluviógrafos	14
Pluviómetros	68
Estaciones evaporimétricas	28
Estaciones para fines especiales	5

Esta labor es solo complementaria a la desarrollada por el Servicio Meteorológico Chileno que es insignificante en las zonas de interés hidrológico.

b) Hidrometeorología. En combinación con el Fondo Especial de las Naciones Unidas se está estudiando la relación entre la evaporación de un ambalse y la evaporación medida con evaporímetros de varios tipos o la determinada con fórmulas.

Además se están estudiando los efectos reductores de capas monomoleculares de hexadecanol en embalses. Esta investigación se iniciará en el verano 1962 - 1963.

c) Transporte sólido. Para el diseño de sus centrales, ENDESA necesita una estimación de la sedimentación en el embalse que se formará con la construcción de la represa de la mencionada obra, y además se requiere una estimación del daño que el sedimento producirá a las turbinas y otras obras hidráulicas.

La División Hidrología de esa Empresa ha sido la encargada de la obtención de los datos y de su posterior elaboración e interpretación. En este tema se ha hecho progresos de alguna importancia, pero su relación se apartaría de la índole general de este trabajo.

8.- Conclusiones

El esquema expuesto dá una idea somera de la importancia que tiene la hidrología para el desarrollo hidroeléctrico de un país en expansión. Lo dicho es igualmente aplicable a todos los demás proyectos de aprovechamiento hidráulico, casos en los que generalmente estos aspectos son descuidados. No es necesario insistir en lo perjudicial que esta política puede resultar (tranques que no se llenan o se infiltran totalmente; vetederos insuficientes, etc.) y siempre el dinero invertido en estudios e investigaciones hidrológicas es devuelto con creces.

Es también altamente satisfactorio constatar que toda esta labor ha podido realizarse con personal totalmente chileno, el que ha contado con facilidades para perfeccionarse en el extranjero y para dar y recibir asistencia técnica.

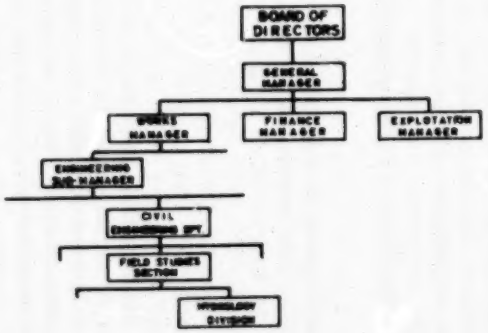

FIGURE I
ENDESA ORGANIZATION CHART

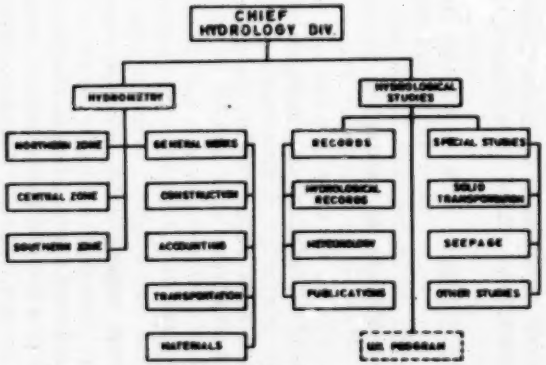

FIGURE II
HYDROLOGY ORGANIZATION CHART

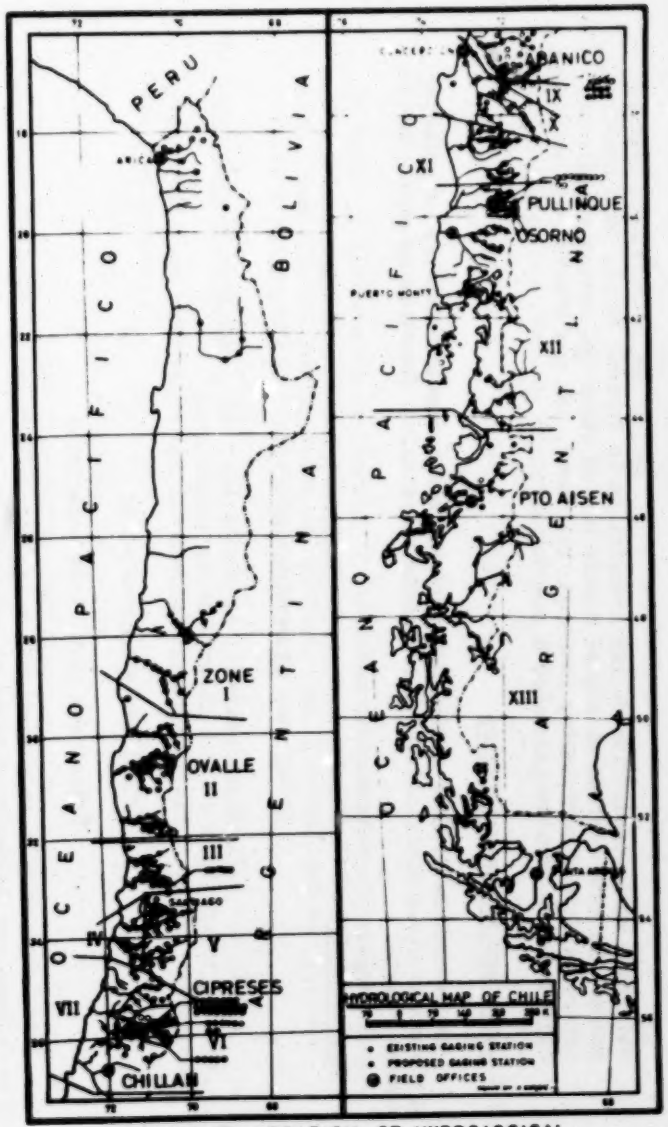

FIGURE III LOCATION OF HYDROLOGICAL STATIONS AND OFFICES

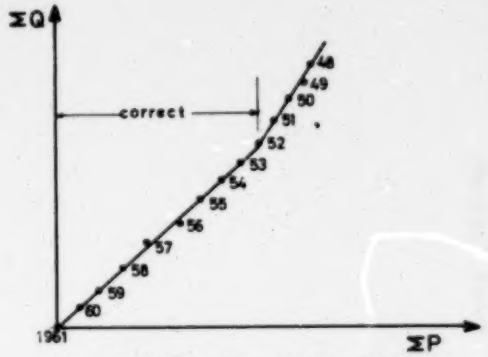

FIGURE IV MASS CURVE

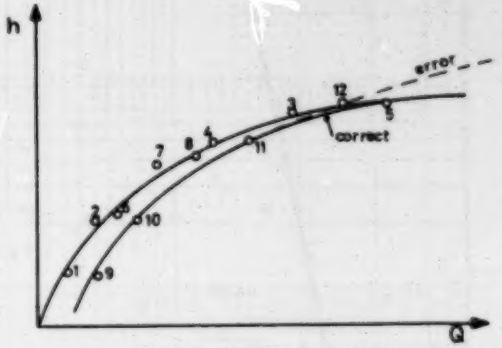

FIGURE V RATING CURVES

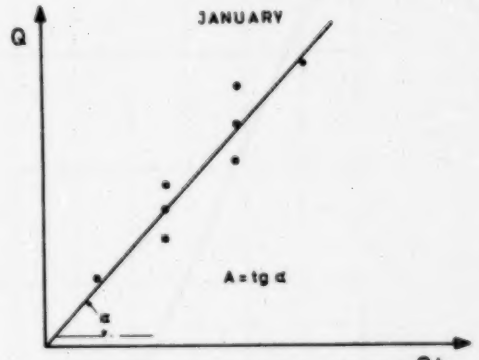

FIGURE VI CORELATION BETWEEN FLOWS OF TWO RIVERS

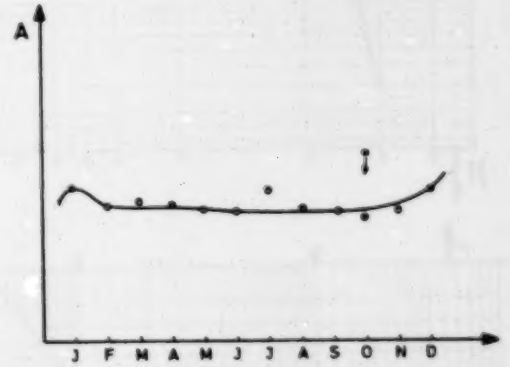

FIGURE VII CHECK ON VALUES OF A

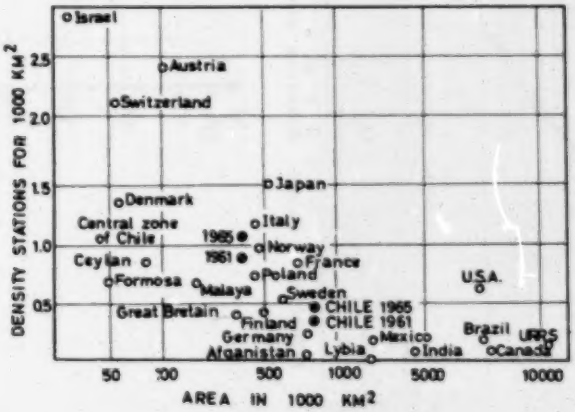

FIGURE VIII
COMPARED DENSITY OF GAGING STATIONS FLOW NETS IN SEVERAL COUNTRIES

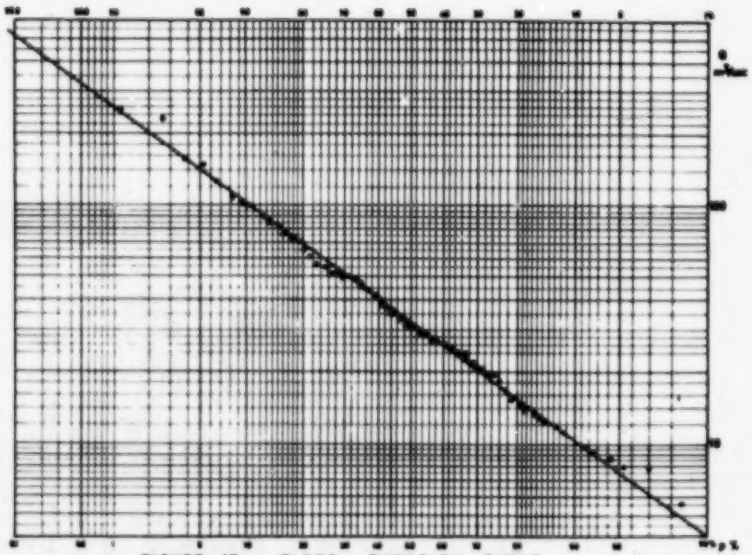

FIGURE IX FLOOD DURATION CURVE.

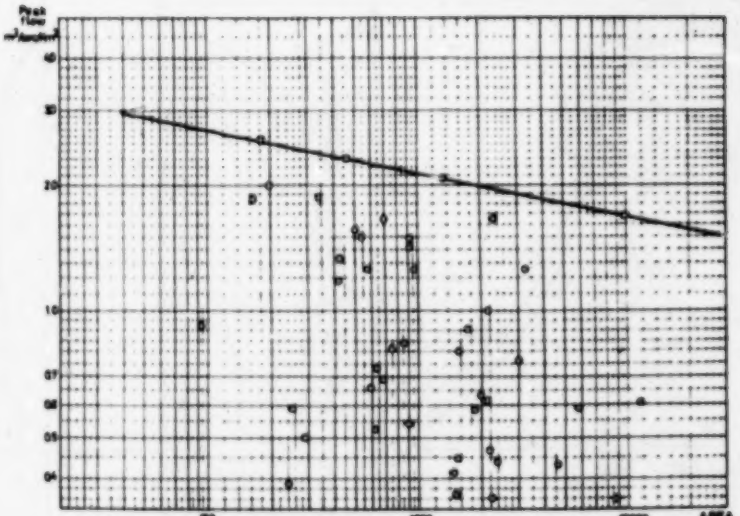

FIGURE X FLOOD ENVELOPE

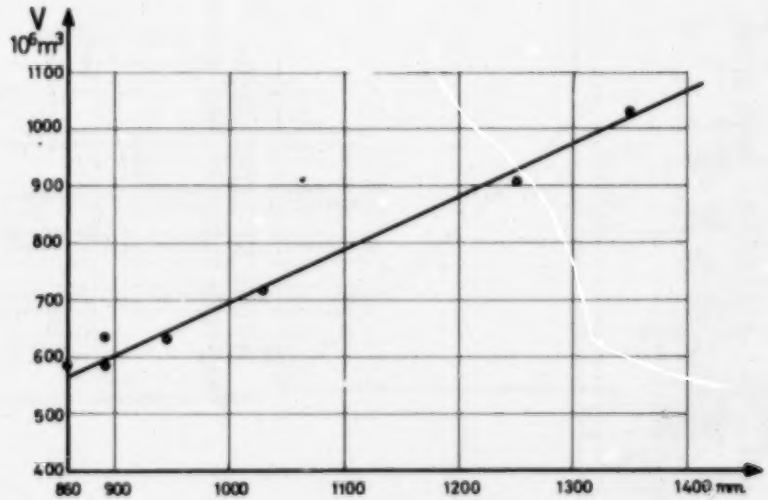

FIGURE XI - SNOW - RUNOFF CORELATION

1456 S - Nov. 1962 - 600